

УДК 551.463.21

## ВЫДЕЛЕНИЕ МОД ИЗ ШУМОВОГО ПОЛЯ МЕЛКОГО МОРЯ ОДИНОЧНЫМИ ДОННЫМИ ГИДРОФОНАМИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПАССИВНОЙ ТОМОГРАФИИ

© 2014 г. В. А. Буров\*, А. В. Гринюк\*\*, В. Н. Кравченко\*\*, П. Ю. Муханов\*,  
С. Н. Сергеев\*, А. С. Шуруп\*

\*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет  
119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы

Тел.: (495) 939-30-81; E-mail: burov@phys.msu.ru

\*\*ОАО "НИИ "Атолл"

141981 Дубна, ул. Приборостроителей 5

Тел.: (496) 212-73-93; E-mail: kvn@atoll.dubna.ru

Поступила в редакцию 10.04.2014 г.

Рассматривается возможность выделения мод, распространяющихся между двумя пространственно разнесенными точками наблюдения, без использования вертикальных антенн и низкочастотных излучателей. Выделение мод происходит из взаимной функции корреляции шумов, принимаемых одиночными гидрофонами. Показано, что основной вклад в взаимную функцию корреляции шумов дают моды на частотах вблизи минимумов дисперсионных зависимостей их групповых скоростей, где наблюдаются области стационарной фазы. Этот факт позволяет идентифицировать моды разных номеров, а также оценить времена их распространения между приемными гидрофонами, что может стать основой построения пассивной модовой томографии мелкого моря по данным с одиночных донных гидрофонов. Селекция мод осуществлена на основе данных натурального эксперимента, проводившегося в Баренцевом море.

**Ключевые слова:** селекция мод, пассивная томография, мелкое море, взаимная функция корреляции шумового поля.

DOI: 10.7868/S0320791914060045

### ВВЕДЕНИЕ

Акустическая томография океана является перспективным методом мониторинга обширных морских акваторий, позволяющим получать информацию о пространственно-временной изменчивости исследуемого региона в режиме, близком к режиму реального времени. Изначально методы акустической томографии были разработаны для глубокого океана [1], однако в последнее время в связи с широкомасштабным освоением шельфа все больше внимания уделяется вопросам акустического мониторинга мелкого моря. В этом случае задача усложняется с точки зрения теоретического описания распространения акустических волн в мелком море (приходится учитывать влияние дна, интенсивные внутренние волны, принимать во внимание неадиабатическое распространение звука, дисперсионные свойства волновода), однако упрощается с точки зрения практической реализации (снижение стоимости и технической сложности проведения натурального эксперимента). Еще проще станет эксперимент при переходе к пассивному режиму, так как при этом не нужно решать вопросы создания, развертывания и энерго-

питания разнесенных по периметру изучаемой акватории низкочастотных излучателей.

Уменьшение числа приемных элементов и возможность, в предельном случае, отказаться от развертывания вертикальных приемных антенн также нельзя не принимать во внимание. Как оказалось, вполне возможно реализовать мониторинг мелкого моря с использованием одиночных донных гидрофонов. Так, в работе [2] описывается сравнительно дешевый и простой в реализации натуральный эксперимент по акустической томографии, который был проведен на шельфе Черного моря в конце 2010 года. Используя лучевую модель распространения, авторы оценили существенные изменения скорости звука и параметров течений в исследуемой области, а также колебания нижней границы термоклина на основе данных излучения и приема акустических сигналов тремя автономными донно-поверхностными станциями, расположенными в вершинах практически равносоставленного треугольника. Несмотря на то, что область исследования была невелика и имела линейные размеры около 1 км, описанный эксперимент является, по-видимому, первым томографиче-

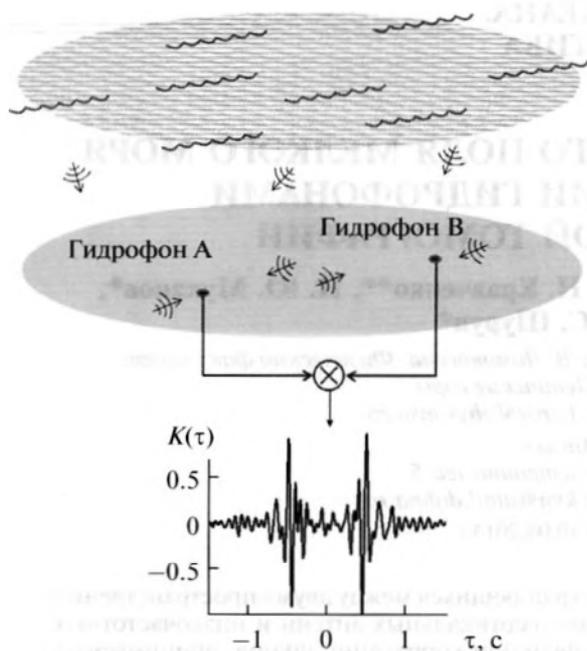


Рис. 1. Схема корреляционной обработки шумов мелкого моря, принятых донными гидрофонами. Взаимная функция корреляции  $K(\tau)$  данных с гидрофонов  $A$  и  $B$  имеет два пика, соответствующих временам распространения сигналов по направлению от  $A$  к  $B$  и в обратном направлении.

ским экспериментом в мелком море, позволившем восстановить упомянутые характеристики исследуемой области на основе данных с одиночных донно-поверхностных трансиверов. Возможности реализации подобного акустического мониторинга, но на больших расстояниях, исследовались в работе [3]. Авторами этой работы была показана возможность мониторинга полей течений и температуры при использовании сложных сигналов, излучаемых и принимаемых одиночными донными трансиверами, расположенными на расстояниях до 15 км в шельфовой зоне Японского моря в районе акустико-гидрофизического полигона ТОИ ДВО РАН. Авторы работы [3] пришли к выводу, что обработка данных этих экспериментов обеспечивает возможность измерения температуры воды с точностью до  $1^\circ\text{C}$  и скорости течения с точностью до 0.1 м/с. Отмеченные две экспериментальные работы свидетельствуют о практической возможности реализации сравнительно дешевой акустической томографии мелкого моря с помощью донных или донно-поверхностных станций.

В отличие от работ [2, 3], в представляемой работе делается попытка выделения мод одиночными гидрофонами из шумового сигнала, что в будущем может стать основой акустической томографии мелкого моря. Эта задача не может быть сведена к задаче, в которой моды возбуждаются

активным источником, поскольку требует накопления шумового сигнала во времени и, следовательно, иного использования дисперсионных свойств волновода. При этом основная цель, поставленная авторами, — проиллюстрировать возможность селекции отдельных мод одиночными донными гидрофонами и возможность оценки времен распространений импульсов, соответствующих отдельным модам, между приемными гидрофонами в заданных частотных диапазонах. Использование именно модового подхода в пассивной томографии, в свою очередь, необходимо для сокращения времени накопления сигнала [4].

### ОЦЕНКА ВРЕМЕН РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ МЕЖДУ ОДИНОЧНЫМИ ДОННЫМИ ГИДРОФОНАМИ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКТИВНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

В данном разделе на основе записей естественных шумов моря, сделанных одиночными донными гидрофонами в Баренцевом море, выделяются корреляционные пики, соответствующие распространению мод низших номеров между гидрофонами. Тем самым показывается, что метод обработки позволяет достаточно надежно регистрировать времена распространения мод (которые определяются свойствами среды и дна) между каждой парой рассматриваемых гидрофонов. Обсуждаются вопросы, связанные со временем накопления сигнала.

В настоящее время развитие томографии океана видится в переходе к пассивному режиму, т.е. в отказе от излучателей и в использовании собственных шумов океана в качестве источника звука. Помимо того, что гидроакустические излучатели дороги, громоздки и сложны для установки и питания, низкочастотный звук, который они издают, может оказывать пагубное влияние на морских обитателей, что влечет за собой серьезные экологические проблемы. Возможность использования в гидроакустических задачах естественного шума моря в качестве источника информации о среде стала понятна после “переоткрытия” акустикой известного в квантовой теории поля соотношения между двухточечной взаимной функцией корреляции и функцией Грина среды [5].

Основная идея метода заключается в следующем. Пусть рассматриваемая акватория изотропно и однородно зашумлена удаленными источниками (ветровое волнение, удаленное судоходство и т.д.) (рис. 1). Часть этого общего шумового сигнала проходит последовательно через одиночные гидрофоны  $A$  и  $B$ , что эквивалентно схеме, в которой гидрофон  $A$  излучает, а гидрофон  $B$  принимает излученный гидрофоном  $A$  сигнал [4]. При этом та часть общего шума, которая воздействует только на один из обозначенных гидрофонов (т.е. не распро-

страняется вдоль лучевой траектории  $AB$ ), должна рассматриваться как помеха. Для выделения известного для “первого” гидрофона сигнала на фоне помехи используется корреляционный метод обработки. Взаимная функция корреляции  $K(\tau)$  шумовых данных с двух пространственно разнесенных гидрофонов  $A$  и  $B$  при этом будет иметь два пика, соответствующих регистрации обоими гидрофонами сигнала, распространяющегося по направлению от  $A$  к  $B$  и в обратном направлении. Положение этих пиков на оси взаимного временного сдвига  $\tau$  коррелируемых действительных сигналов  $U(\mathbf{r}_A, t)$  и  $U(\mathbf{r}_B, t)$  относительно нулевого сдвига определяется временем распространения сигналов между этими гидрофонами (рис. 1). Здесь  $K(\tau) = \langle U(\mathbf{r}_A, t)U(\mathbf{r}_B, t - \tau) \rangle$ ,  $\mathbf{r}_A$  и  $\mathbf{r}_B$  характеризуют координаты гидрофонов  $A$  и  $B$ , скобки  $\langle \cdot \rangle$  означают усреднение по множеству реализаций шумовых сигналов. Появление в акватории между гидрофонами  $A$  и  $B$  изотропной (например, рефракционной) неоднородности приводит к одинаковому смещению обоих корреляционных пиков на оси временного сдвига, а появление анизотропной неоднородности (например, течения) обнаруживается из-за несимметричного смещения пиков. Применительно к океану метод оценки функции Грина из взаимной функции корреляции шумов был развит рядом авторов [6]. Так, например, в работе [7] этот метод был теоретически развит на среды с течением.

Таким образом, полученные данные теоретически можно использовать в целях построения схем пассивной томографии. Однако встает вопрос, насколько реально выделить эти пики в случае экспериментальных данных и как по ним селективировать отдельные моды. Дело в том, что слабой стороной метода является вопрос о необходимом времени накопления сигнала. Так, для использования схемы, в которой коррелируются полные поля, принятые разнесенными гидрофонами [8–12], необходимое время накопления может составлять порядка суток, что не позволяет отслеживать процессы, обладающие большей временной изменчивостью. Однако, как показано в [4], время накопления сильно уменьшается при использовании метода, основанного на корреляции отдельных мод. Это связано с тем, что моды являются двумерными вертикальными “объектами”, распространяющимися в горизонтальной плоскости, в то время как корреляция полных полей, принимаемых точечными гидрофонами, является корреляцией трехмерных “объектов”. В результате, в случае метода, основанного на корреляции мод, необходимое время накопления шумового сигнала, по сделанным оценкам [4], уменьшается до четырех часов или даже до одного часа при использовании приемников градиентного типа, что

приемлемо для решения практических задач акустической томографии.

В настоящей работе рассматриваются сигналы, представляющие собой шумы моря, записанные в октябре 2004 г. четырьмя донными гидрофонами, которые располагались в центральной части Баренцева моря. В дальнейшем будут использоваться условные номера этих гидрофонов. Расстояние между гидрофонами 1 и 2 составляло 512 м, между гидрофонами 2 и 3 – 566 м, между гидрофонами 1 и 3 – 1046 м. Расстояния от гидрофонов 1, 2, 3 до гидрофона 4 было известно с меньшей точностью и полагалось равным примерно 13900 м. Глубина моря в месте расположения гидрофонов составляла  $\approx 209$  м, дно было ровным, скорость звука в воде во время эксперимента составляла примерно  $c_0 \approx 1450$  м/с с несущественным изменением вблизи дна. По техническим причинам регистрация шумового поля осуществлялась в виде коротких записей – реализациями по 27.5 с, что явилось сдерживающим фактором при использовании в данной работе разнесенных гидрофонов, о чем будет сказано ниже. Для анализа экспериментальных данных были выбраны 433 реализации, записанные каждым из гидрофонов в течение одних суток в разное время; полагалось, что эти записи для рассматриваемых гидрофонов синхронизованы по времени с высокой точностью. В итоге эффективное время накопления шумового сигнала за одни сутки для каждого гидрофона составило примерно 3.3 ч. При расчете  $K(\tau)$  по реализациям с пары гидрофонов вначале рассчитывались взаимные функции корреляции для каждой из 433 шумовых реализаций, а затем полученные результаты усреднялись.

Выбор частотного диапазона для корреляционной обработки шумов определялся двумя факторами. С одной стороны, для увеличения отношения сигнал/помеха частотный диапазон должен быть как можно шире. С другой стороны, в этой полосе частот сигнал должен быть сформирован небольшим количеством мод, чтобы корреляционная обработка шума соответствовала корреляциям отдельных мод, а не полных полей. В итоге на первом шаге была выбрана полоса частот 5–15 Гц, в которой, исходя из глубины волновода  $\approx 209$  м и скорости звука  $c_0 \approx 1450$  м/с, должны распространяться примерно три первые моды. На рис. 2 представлены взаимные функции корреляции (нормированные на максимальное значение их модуля), рассчитанные для фиксированных пар гидрофонов. Для расстояний между гидрофонами 512, 566 и 1046 м отчетливо видны пики на временных задержках, соответствующих временам распространения сигналов между гидрофонами: 0.47 с для гидрофонов 1 и 2 (рис. 2а); 1.05 с для гидрофонов 1 и 3 (рис. 2б); 0.58 с для гидрофонов 2 и 3 (рис. 2в). Тем самым, при увеличении расстояния между гидрофонами примерно в два раза

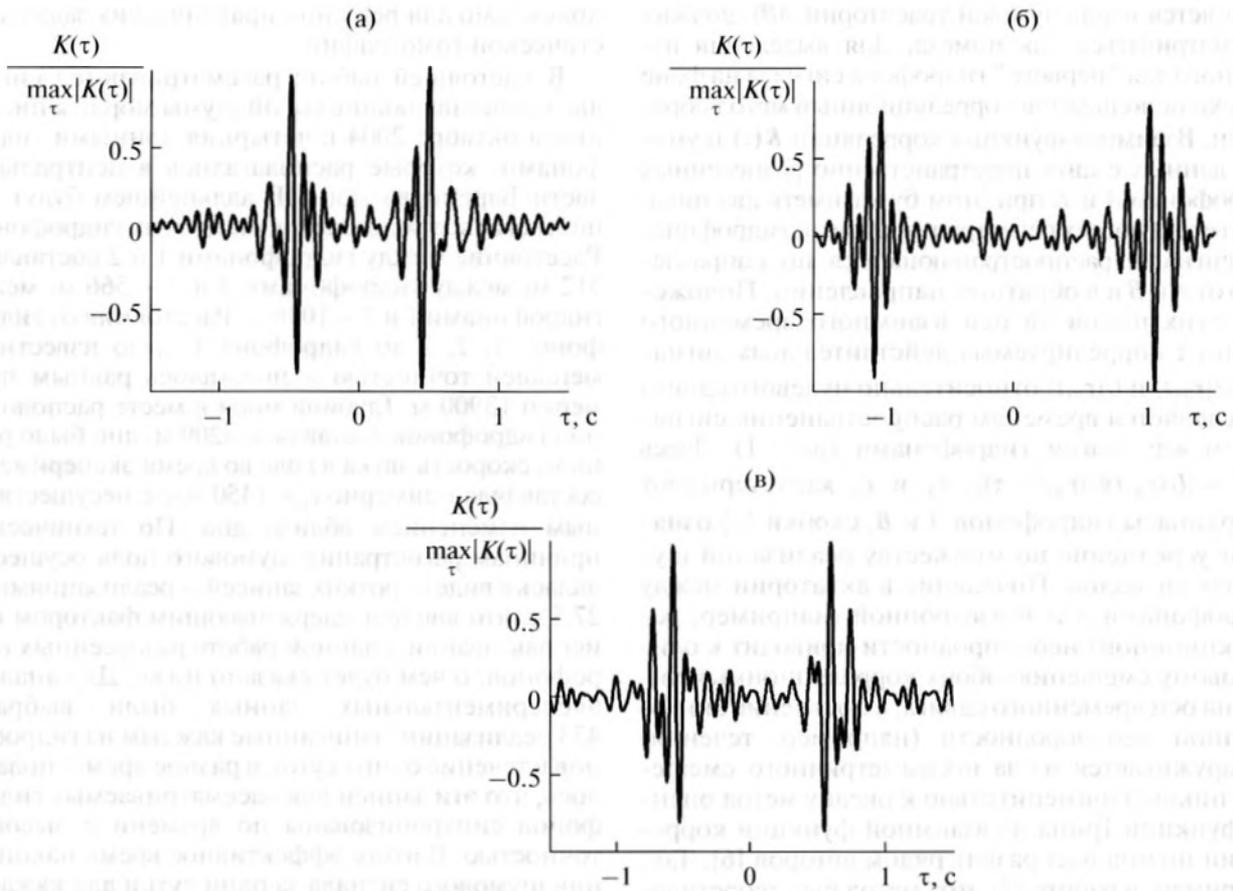


Рис. 2. Нормированные взаимные функции корреляции  $K(\tau)$ , рассчитанные по экспериментальным данным от фиксированных пар гидрофонов в полосе частот 5–15 Гц: (а) гидрофоны 1 и 2; (б) гидрофоны 1 и 3; (в) гидрофоны 2 и 3.

пики функций корреляции смещаются по временной задержке  $\tau$  также в два раза, как и должно быть. Времена распространения, которые в настоящей работе оцениваются по максимумам огибающих взаимных функций корреляции, позволяют оценить групповые скорости распространения сигналов между рассматриваемыми гидрофонами. Эти скорости оказываются разными для разных пар гидрофонов, что свидетельствует о разных условиях распространения сигналов между рассматриваемыми точками. При этом в среднем для гидрофонов 1, 2 и 3 групповая скорость распространения звука между ними составляет примерно  $c_{gr} \approx 1030$  м/с, что заметно меньше фазовой скорости звука в воде  $c_0$ . Это согласуется с тем, что наблюдаемые времена характеризуют распространение сигналов с соответствующими групповыми скоростями.

На рис. 3а приведены результаты корреляционной обработки данных с пары гидрофонов 2 и 4 в полосе частот 5–15 Гц. Видно, что для расстояний между гидрофонами  $\approx 13900$  м взаимная функция корреляции не позволяет оценить времена распространения сигналов, как это было

возможно для меньших расстояний (для пары гидрофонов 1 и 4, а также для пары 3 и 4, получаются результаты, аналогичные приведенным на рис. 3). Увеличение фактора накопления за счет увеличения полосы частот также не приводит к желаемому результату (рис. 3б). Используемое время накопления оказывается недостаточным для оценки времен распространения сигнала между упомянутыми гидрофонами из взаимной функции корреляции шумового поля для рассматриваемого частотного диапазона и расстояний. Одна из причин заключается в том, что из 27.5 с записи одной реализации шума примерно 14 с тратится на распространение сигнала между приемными гидрофонами, расположенными на расстоянии около 14 км, в предположении того, что групповая скорость сигнала составляет  $c_{gr} \approx 1030$  м/с, как и для сигналов, распространяющихся между гидрофонами 1, 2, 3. Оставшиеся 13.5 с при усреднении по 433 реализациям дают лишь 1.6 часа эффективного времени накопления. Кроме этого поле, принимаемое в достаточно широкой полосе частот, может быть сформировано многими модами, что также требует увеличения

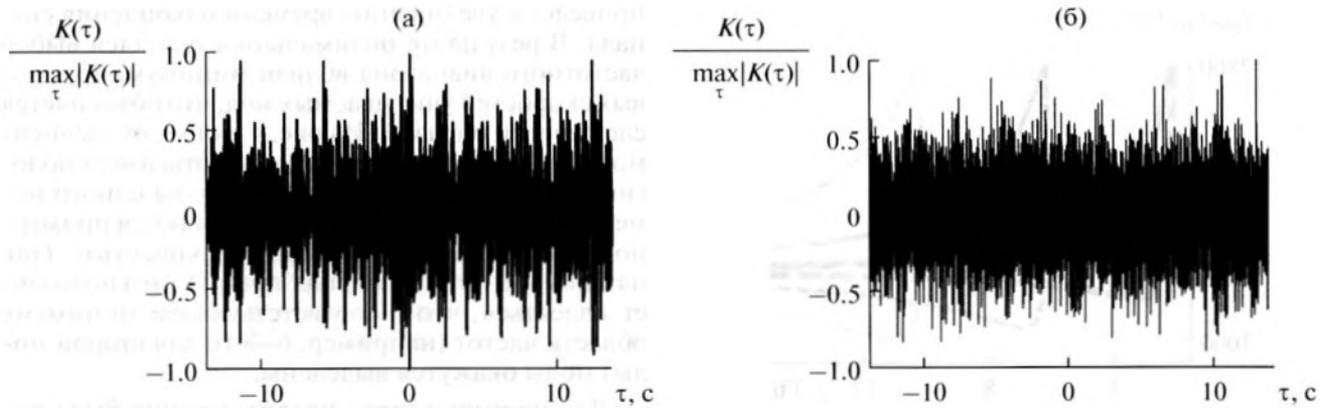


Рис. 3. Нормированные взаимные функции корреляции, рассчитанные по экспериментальным данным от пары гидрофонов 2 и 4 в разных полосах частот: (а) полоса 5–15 Гц; (б) полоса 3–80 Гц.

времени накопления по сравнению с корреляционной обработкой шумового поля, сформированного одной модой. Потенциальное улучшение отношения сигнал/помеха в условиях рассматриваемого эксперимента может быть основано на выделении отдельных мод в принимаемом шумовом сигнале.

### СЕЛЕКЦИЯ МОД ИЗ ШУМОВОГО ПОЛЯ, ПРИНИМАЕМОГО ОДИНОЧНЫМИ ДОННЫМИ ГИДРОФОНАМИ В МЕЛКОМ МОРЕ

В данном разделе исследуются вопросы, связанные с выбором частотной полосы шумового сигнала в целях получения оценки времен распространения выделенных мод между одиночными гидрофонами. Показано, что наиболее предпочтителен выбор частотных полос вблизи минимумов групповых скоростей учитываемых мод.

Для выделения мод в принятом сигнале обычно используются вертикальные антенны, состоящие из набора гидрофонов. В случае мелкого моря с почти изоскоростным профилем гидрологии вертикальные антенны должны перекрывать всю глубину. В глубоком океане, где волноводные свойства во многом обуславливаются наличием подводного звукового канала, достаточно перекрыть область, в которой сосредоточена основная энергия учитываемых мод. Однако в обоих случаях длина антенн может составлять сотни метров. Отсюда возникают понятные проблемы как с техническим развертыванием антенн, так и с локализацией отдельных гидрофонов, поскольку под действием подводных течений антенны без принятия дополнительных мер искривляются и сносятся. Ранее, в работах [13, 14], были предложены методы анализа сигналов, соответствующих отдельным модам, с искривленных и смещенных антенн, что позволяет упростить техническую сторону эксперимента. Отказ от вертикальных антенн

упростил бы томографический эксперимент в еще большей степени. Ниже делается попытка определить модовый состав сигнала по данным с одиночных гидрофонов.

Основное назначение вертикальной антенны — “принять” профиль отдельной моды, что, собственно, и позволяет выделить эту моду из общего сигнала по причине ортогональности мод на всей глубине волновода. Одиночный гидрофон не позволяет выделить профиль моды, поэтому при работе с ним должны быть использованы иные принципы, например выделение мод по времени их прихода при импульсном источнике. Так, например, в работе [15] рассматривалась задача определения модового состава акустического поля, принимаемого одним гидрофоном при учете внутримодовой дисперсии. С помощью излучения ЛЧМ сигнала в достаточно широкой полосе частот (100–350 Гц) и его приема на расстояниях 8 и 15 км удалось выделить импульсы, соответствующие отдельным модам. Для учета дисперсии рассматривалась модель волновода Пекериса. Возможность селекции мод при активном излучении широкополосного сигнала и его одноточечном приеме была показана в [15] как на модельных расчетах, так и на данных натурального эксперимента в Баренцевом море. В настоящей работе, в отличие от [15], анализируется возможность определения модового состава при приеме поля одиночными гидрофонами в пассивном режиме, т.е. без использования активного излучения. В этом случае, как будет показано ниже, определяющую роль играет выбор частотного диапазона, в котором происходит поиск мод заданных номеров.

Для выбора полосы частот, в которой осуществляется поиск и выделение мод, были рассчитаны фазовые и групповые скорости мод для модели волновода Пекериса глубиной 209 м, со скоростью звука в воде 1450 м/с, скоростью звука в дне 2800 м/с, отношением плотностей грунта и водного слоя 1.3 (рис. 4). Из рис. 4 видно, что в

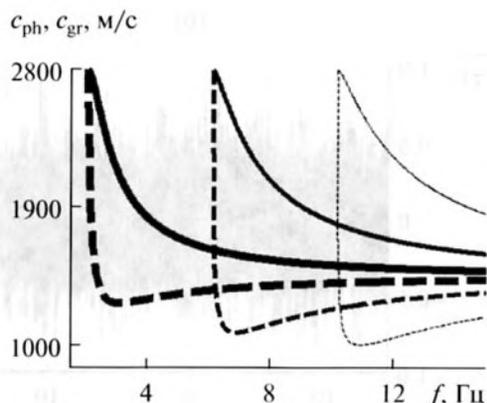


Рис. 4. Частотные зависимости фазовых  $c_{ph}$  (сплошные линии) и групповых  $c_{gr}$  (пунктирные линии) скоростей первых трех мод, рассчитанные для модели волновода Пекериса, используемой в настоящей работе: толстые линии – для первой моды, линии средней толщины – для второй моды, тонкие линии – для третьей моды.

полосе частот 5–15 Гц поле формируется преимущественно первыми тремя модами.

Поскольку выделение мод осуществляется без вертикальных антенн, то, как кажется на первый взгляд, следует использовать частотные диапазоны, в которых межмодовая дисперсия максимальна, поскольку это позволяет надеяться на разделение мод по времени. Однако, как было обнаружено, это не так: внутримодовая дисперсия “развалит” каждую моду по отдельности по пути ее распространения, а сужение частотного диапазона в целях борьбы с внутримодовой дисперсией

приведет к увеличению времени накопления сигнала. В результате оптимальным оказался выбор частотного диапазона вблизи минимума групповой скорости учитываемых мод, что объясняется следующим образом. Из рис. 4 видно, что зависимость групповой скорости от частоты имеет пологий минимум, вблизи которого моды одного номера и близких частот распространяются примерно с одинаковой групповой скоростью (так называемая “стационарная точка”). Это позволяет надеяться, что в соответствующей минимуму области частот (например, 6–8 Гц для второй моды) моды окажутся выделены.

Для проверки этого предположения была построена спектрограмма взаимной функции корреляции сигналов, принятых гидрофонами 1 и 3 (рис. 5а), а также между гидрофонами 2 и 3 (рис. 5б). Спектрограмма  $K_{sp}(\tau', f)$  взаимной функции корреляции  $K(\tau)$  рассчитывалась на основе стандартного соотношения (см., например, [16]):

$$K_{sp}(\tau', f) = \int_{-\infty}^{+\infty} K(\tau)h(\tau - \tau') \exp(-i2\pi f\tau) d\tau.$$

Здесь функция  $h(\tau - \tau')$  имела форму прямоугольного импульса длительностью 0.5 с (с центром в точке  $\tau = \tau'$ ), сглаженного на краях; сдвиг по центральной временной задержке  $\tau'$  осуществлялся с шагом 0.016 с;  $f$  – частота в герцах;  $\tau$  – временной сдвиг, аргумент функции  $K(\tau)$ , в секундах. На приведенных графиках спектрограмм  $|K_{sp}(\tau', f)| / \max_{\tau', f} |K_{sp}(\tau', f)|$ , нормированных на их максимальные значения (рис. 5), явно выделены экстремальные всплески при  $\tau'$  в окрестно-

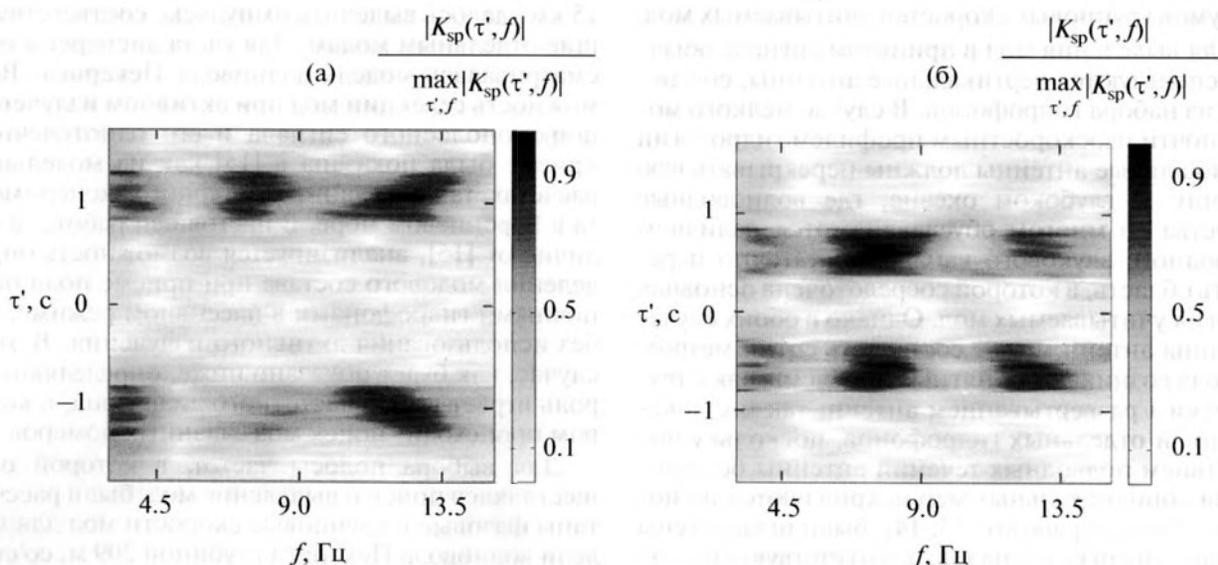
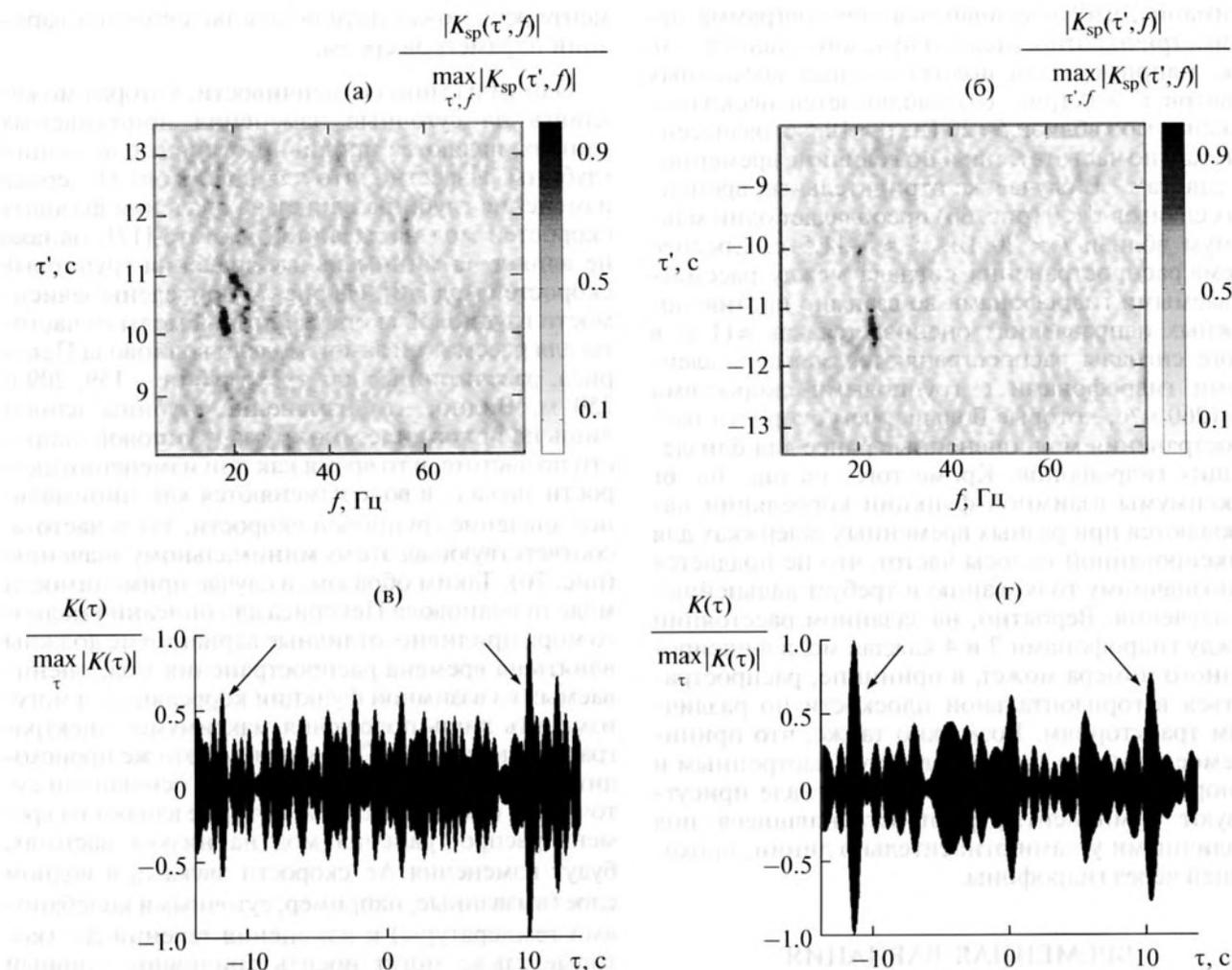


Рис. 5. Нормированные модули спектрограмм  $|K_{sp}(\tau', f)|$  взаимных функций корреляции, рассчитанные по экспериментальным данным от пары гидрофонов 1 и 3 (а) и от пары гидрофонов 2 и 3 (б).



**Рис. 6.** Нормированные спектрограммы взаимных функций корреляции, рассчитанные по данным от пары гидрофонов 2 и 4 в полосе частот 3–80 Гц; положительные (а) и отрицательные (б) временные сдвиги  $\tau'$  соответствуют взаимно-противоположным направлениям распространения сигналов. Соответствующие примеры взаимных функций корреляции, получаемые для этой пары гидрофонов в разных частотных диапазонах: (в) полоса частот 16.5–19 Гц, в которой ожидалась пятая мода; (г) полоса 21.5–23 Гц, в которой ожидалась шестая мода (максимумы, соответствующие этим модам, обозначены стрелками).

сти двух максимумов функций корреляции для рассматриваемой пары гидрофонов (рис. 2б, 2в). Эти всплески соответствуют минимумам групповых скоростей отдельных мод (например, область 6–8 Гц – для второй моды, 11–13 Гц – для третьей моды), что подтверждает сделанное предположение.

После этого логичным казалось провести подобный анализ и для гидрофонов, находящихся на расстоянии  $\approx 13.9$  км, для которых не наблюдалось изначально заметно выделяющихся по амплитуде пиков во взаимной функции корреляции. На рис. 6а, 6б изображена спектрограмма взаимной функции корреляции шумовых сигналов, принятых гидрофонами 2 и 4 в полосе 3–80 Гц. Видно, что максимумы на спектрограмме наблюдаются вблизи 20 Гц. Оценки, сделанные для рас-

сматриваемой модели Пекериса, показывают, что вблизи 20 Гц располагаются минимумы групповых скоростей пятой (19 Гц) и шестой (23 Гц) мод. Максимумы, наблюдаемые в спектрограмме, становятся заметны и во взаимной функции корреляции, если в принятом сигнале выделить полосы, соответствующие модам фиксированных номеров (рис. 6в – полоса частот 16.5–19 Гц, что соответствует ожиданию пятой моды; рис. 6г – полоса 21.5–23 Гц, в которой ожидалась шестая мода). Максимумы спектрограммы наблюдаются не в строго ожидаемых частотных диапазонах (с центром в 19 Гц для пятой моды, и 23 Гц для шестой моды), а в соседних, более низкочастотных областях, что может быть объяснено неполным соответствием используемой модели волновода Пекериса реальному волноводу. Следует обратить

внимание, что получившаяся спектрограмма несимметрична относительно нулевого сдвига  $\tau' = 0$ . Так, например, для положительных временных сдвигов  $\tau' > 0$  (рис. 6а) наблюдается несколько максимумов вблизи  $f \approx 20$  Гц,  $\tau' \approx 10.5$  с, разнесенных как по частоте  $f$ , так и по величине временного сдвига  $\tau'$ . В случае же отрицательных временных сдвигов  $\tau' < 0$  (рис. 6б) преобладает один максимум вблизи  $f \approx 20$  Гц,  $\tau' \approx -11.5$  с. Среднее время распространения сигнала между рассматриваемыми гидрофонами во взаимно противоположных направлениях оценивается как  $\approx 11$  с; в итоге сигналы распространяются между удаленными гидрофонами с групповыми скоростями  $c \approx 1260$  м/с, которые больше, чем скорости распространения мод, оцененные ранее для близлежащих гидрофонов. Кроме того, на рис. 6в, 6г максимумы взаимной функции корреляции наблюдаются при разных временных задержках для фиксированной полосы частот, что не поддается однозначному толкованию и требует дальнейшего изучения. Вероятно, на заданном расстоянии между гидрофонами 2 и 4 каждая мода фиксированного номера может, в принципе, распространяться в горизонтальной плоскости по различным траекториям. Возможно также, что принимаемое шумовое поле не является изотропным и однородным, а в принимаемом сигнале присутствуют компоненты, распространявшиеся под различными углами относительно линии, проходящей через гидрофоны.

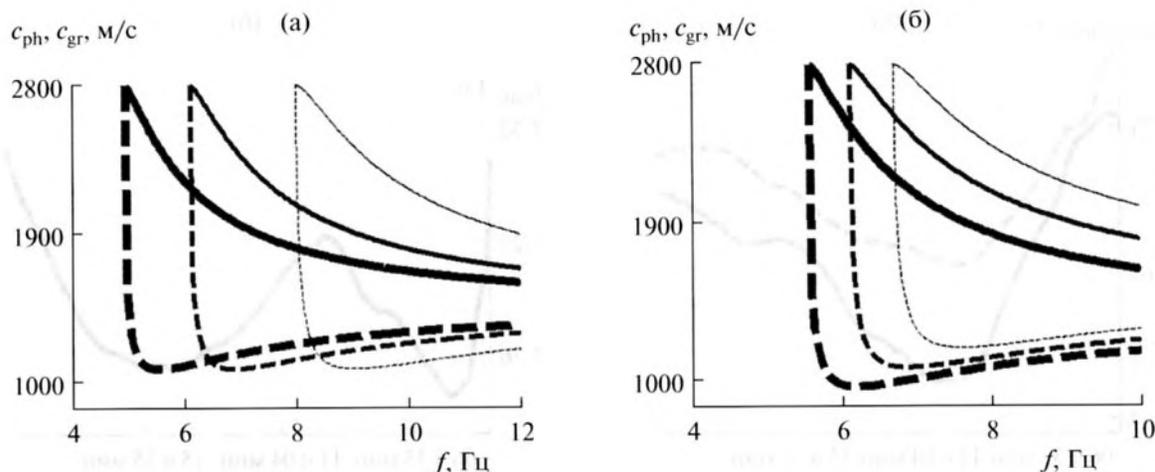
### ВРЕМЕННАЯ ВАРИАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ

В данном разделе предпринимается попытка отследить изменение положения полученных корреляционных пиков во времени, что может быть следствием вариации параметров среды и, следовательно, свидетельствовать о потенциальной возможности рассматриваемого корреляционного метода для построения схем мониторинга акватории. Имеющиеся в распоряжении авторов данные позволяют сделать вывод, что, действительно, такой мониторинг возможен, поскольку регистрируется суточное смещение пиков. Однако однозначная интерпретация причин, вызвавших эти смещения, затруднена и требует проведения дополнительных экспериментов.

Возникает вопрос, насколько имеющиеся экспериментальные данные позволяют говорить о принципиальной возможности мониторинга различных объектов, могущих представлять практический интерес. Иными словами, насколько выглядит реалистичным построение томографической схемы, основанной на оценке времен распространения сигналов, соответствующих рассматриваемым модам, из взаимной функции корреляции шумового поля. В рамках настоящего экспери-

мента речь может идти об оценке суточных вариаций параметров среды.

Одним из типов изменчивости, которая может влиять на суточные изменения принимаемых данных, являются приливно-отливные вариации глубины. Известно, что для волновода Пекериса изменение глубины влияет на значения фазовых скоростей мод на заданной частоте [17], однако не влияет на минимальные значения групповых скоростей мод [18]. На рис. 7а приведены зависимости групповой скорости второй моды от частоты для рассматриваемой модели волновода Пекериса, рассчитанные для трех глубин — 159, 209 и 250 м. Видно, что изменение глубины влияет лишь на положение минимума групповой скорости по частоте, в то время как при изменении скорости звука  $c_0$  в воде изменяются как минимальное значение групповой скорости, так и частота, соответствующая этому минимальному значению (рис. 7б). Таким образом, в случае применимости модели волновода Пекериса для описания мелкого моря приливно-отливные вариации не должны влиять на времена распространения мод, оцениваемых из взаимной функции корреляции, а могут изменять лишь положения максимумов спектрограммы по частоте. По-видимому, это же происходит и в реальном волноводе. Тогда основными суточными изменчивостями, которые влияют на времена распространения мод на низких частотах, будут изменения  $\Delta c$  скорости звука  $c_0$  в водном слое (вызванные, например, суточными колебаниями температуры) и изменения течений  $\Delta v$  (которые также могут носить приливно-отливный характер). Здесь  $\Delta c$  и  $\Delta v$  — отклонения скорости звука и проекции вектора скорости течений (на вертикальную плоскость, проходящую через точки приема) от их среднесуточных значений, усредненные по глубине волновода и по расстоянию между рассматриваемыми гидрофонами. Наличие неоднородностей  $\Delta c$  и  $\Delta v$  приводит к возмущениям времен распространения  $\Delta \tau_s$  модовых сигналов, соответствующих максимумам взаимной функции корреляции. Индекс “s” обозначает сокращение от “signals”, подразумевая, что рассматриваемый сигнал может состоять из мод нескольких номеров и в этом смысле называется здесь модовым сигналом. Возмущения  $\Delta \tau_s$ , в свою очередь, определяются как вариациями групповых скоростей  $\Delta c_s$  модовых сигналов, которые зависят от  $\Delta c$ , так и вариациями  $\Delta v_s$ , которые определяются наличием  $\Delta v$ . Влияние двух типов неоднородностей  $\Delta c_s$  и  $\Delta v_s$  на временные вариации максимумов взаимной функции корреляции модовых сигналов могут быть разделены при рассмотрении полусумм  $\Delta s$  и полуразностей  $\Delta d$  возмущений времен распространения  $\Delta \tau_s^+$ ,  $\Delta \tau_s^-$  во взаимно противоположных направлениях [1, 19].



**Рис. 7.** Частотные зависимости фазовых  $c_{ph}$  (сплошные линии) и групповых  $c_{gr}$  (пунктирные линии) скоростей второй моды, рассчитанные для разных глубин (а) и скоростей звука в водном слое (б) для модели Пекериса, используемой в настоящей работе: (а) толстые линии соответствуют глубине 259 м, линии средней толщины – 209 м, тонкие линии – 159 м; (б) толстые линии соответствуют скорости звука в водном слое 1350 м/с, линии средней толщины – 1450 м/с, тонкие линии – 1550 м/с.

Символ  $\Delta\tau_s^+$  обозначает именно возмущение для полного времени распространения модовых сигналов  $t_{AB}$  от гидрофона  $A$  к гидрофону  $B$ ;  $\Delta\tau_s^-$  – возмущение для полного времени распространения  $t_{BA}$  от  $B$  к  $A$ . Используя выражения для  $\Delta s$  и  $\Delta d$ :

$$\Delta s = (\Delta\tau_s^+ + \Delta\tau_s^-)/2 \approx -\Delta c_s R/c_s^2,$$

$$\Delta d = (\Delta\tau_s^+ - \Delta\tau_s^-)/2 \approx -\Delta v_s R/c_s^2,$$

можно попытаться оценить суточные вариации для  $\Delta c_s$  и  $\Delta v_s$ :

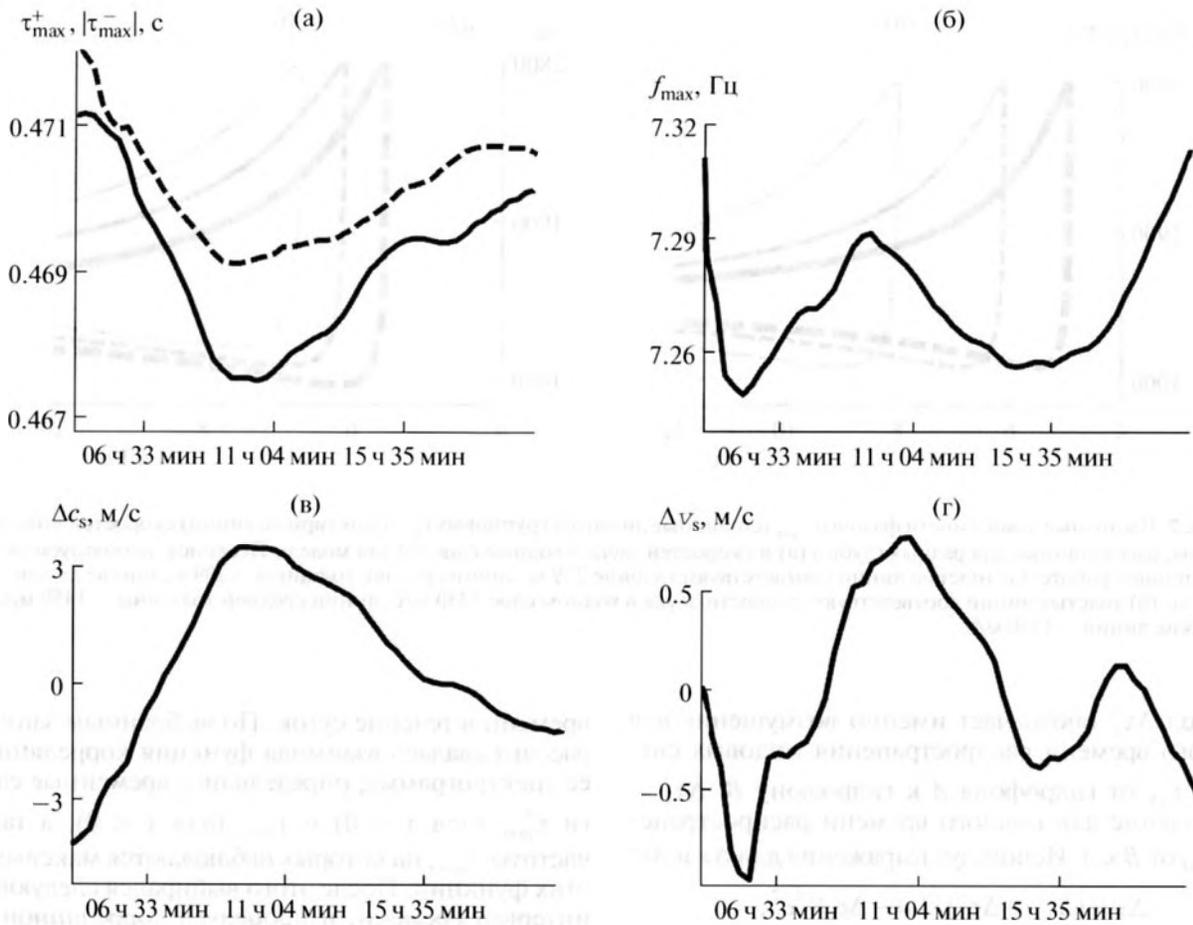
$$\Delta c_s \approx -\Delta s c_s^2/R, \quad \Delta v_s \approx -\Delta d c_s^2/R. \quad (1)$$

Здесь  $R$  – горизонтальное расстояние между точками приема,  $c_s$  – среднесуточное значение групповой скорости распространения модового сигнала между точками приема; предполагается, что  $|\Delta c_s|/c_s \ll 1$  и  $|\Delta v_s|/c_s \ll 1$ . Информация о вариациях  $\Delta c_s$  и  $\Delta v_s$ , полученных на основе (1) для мод разных номеров в различных частотных диапазонах, является исходной для оценки вариаций параметров волновода  $\Delta c$  и  $\Delta v$ . Таким образом, схема пассивного мониторинга мелкого моря по данным с одиночных донных гидрофонов может быть основана на частотно-временной информации, определяемой из взаимной функции корреляции шумового поля мелкого моря. Не претендуя на полное изложение, ниже приводятся предварительные результаты, говорящие в пользу возможности такого мониторинга.

Исследовались суточные изменения положений максимумов функций корреляции, полученных для рассматриваемых гидрофонов. Для этого из полного набора записей шумов выбирались те, которые соответствовали заданному интервалу

времени в течение суток. По выбранным записям рассчитывалась взаимная функция корреляции и ее спектрограмма; определялись временные сдвиги  $\tau_{max}^+$  (для  $\tau > 0$ ) и  $\tau_{max}^-$  (для  $\tau < 0$ ), а также частоты  $f_{max}$ , на которых наблюдаются максимумы этих функций. После этого выбирался следующий интервал времени, и процедура корреляционной обработки повторялась. При анализе экспериментальных данных рассматривались отрезки времени по 5 ч, сдвинутые друг относительно друга на полчаса. В среднем, в заданный интервал времени попадало  $\approx 80$  шумовых записей, т.е. эффективное время накопления составляло  $\approx 37$  мин. На рис. 8 приведены примеры результатов такой обработки, полученные для гидрофонов 1 и 2 (суточные вариации наблюдаются и для других пар гидрофонов) в полосе частот 5–15 Гц. Отчетливо видны изменения положения максимумов  $\tau_{max}^+$  и  $\tau_{max}^-$  взаимных функций корреляции (рис. 8а), которые соответствуют временам распространения сигналов между рассматриваемыми гидрофонами. Используя оцененные таким образом времена, были рассчитаны отклонения  $\Delta\tau_s^+ = \tau_{max}^+ - \tau_0^+$ ,  $\Delta\tau_s^- = \tau_{max}^- - \tau_0^-$ , где  $\tau_0^+$ ,  $\tau_0^-$  – среднесуточные значения  $\tau_{max}^+$  и  $\tau_{max}^-$  соответственно. Далее рассчитывались их полусумма  $\Delta s$  и полуразность  $\Delta d$ , и, наконец, оценивались суточные вариации  $\Delta c_s$  (рис. 8в) и  $\Delta v_s$  (рис. 8г) из соотношений (1).

Из рис. 8в видно, что значение групповой скорости распространения рассматриваемых сигналов между гидрофонами имеет максимум. Одно из возможных объяснений состоит в том, что этот максимум соответствует прогреву воды в дневное



**Рис. 8.** Суточные изменения временных сдвигов  $\tau_{\max}^+$ ,  $|\tau_{\max}^-|$  (а, пунктирная линия соответствует изменениям  $|\tau_{\max}^-|$ , сплошная линия -  $\tau_{\max}^+$ ) и частот  $f_{\max}$  (б), на которых наблюдаются максимумы функции  $K(\tau)$  и ее спектрограммы для шумового поля, записанного гидрофонами 1 и 2 в полосе частот 5–15 Гц. Результаты оценки по этим данным суточных вариаций  $\Delta c_s$  (в) и  $\Delta v_s$  (г); по оси абсцисс отложено текущее время.

время. В пользу такого объяснения свидетельствует и то, что минимальные значения скоростей распространения наблюдаются в ночное время, когда вода остывает.

На рис. 8г приведены суточные зависимости  $\Delta v_s$ , оцененные из полуразностей  $\Delta \tau_s^-$ . Наблюдаются несколько периодов изменения скорости течения как по величине, так и по направлению. Возможно, эти колебания соответствуют полусуточному характеру приливов и отливов в Баренцевом море. В пользу этого предположения говорят также суточные вариации частоты  $f_{\max}$ , соответствующей максимуму спектрограммы взаимной функции корреляции (рис. 8б) в рассматриваемой области частот. Наблюдаются два минимума этой вариации (рис. 8б) — вблизи 04 ч 46 мин и 15 ч 40 мин. Такие вариации можно было бы объяснить приливной активностью, однако имеющиеся экспериментальные данные не позволяют сделать данный вывод наверняка. В пользу высказанного предположения говорят только характер

выявленных вариаций (увеличение глубины ведет к смещению минимумов групповых скоростей мод в низкочастотную область), а также моменты времени в течение суток, которые соответствуют значениям, найденным в таблицах приливов–отливов для времени года и примерного места проведения эксперимента. По данным, представленным на рис. 8б, можно оценить отклонение частоты  $f_{\max}$  от ее среднесуточного значения. Оно составляет  $\approx 0.03$  Гц, что может соответствовать изменению глубины  $\approx 0.6$  м (оценки проводились для рассматриваемой модели волновода Пекериса на основе численного расчета зависимостей групповых скоростей мод от частоты). Подобное изменение глубины вполне характерно для региона исследования [20].

Из рис. 8г видно, что около 18 ч дня во время проведения эксперимента направление скорости течения изменилось на противоположное, хотя предполагалось, что скорость будет лишь расти в это время вместе с отливом. Можно сделать осторожное предположение, что наблюдаемое изме-

нение связано с появлением течения в направлении, противоположном направлению течения приливно-отливной волны в местах расположения гидрофонов.

Приведенные примеры выявленных суточных изменений характеристик волновода показывают, что рассматриваемый пассивный метод чувствителен к временной вариации параметров среды и может быть использован в целях создания схемы мониторинга моря. Вместе с тем, однозначная интерпретация причин такой вариации на основе обработанных данных затруднительна и требует проведения дополнительного эксперимента.

Следует отметить, что в настоящее время разработан и применяется для решения практических задач метод восстановления изменений характеристик среды по данным о частотных смещениях интерференционных максимумов звуковых полей в океанических волноводах [21, 22]. По-видимому, информация, получаемая из взаимной функции корреляции естественного шумового поля мелкого моря в виде смещений частоты  $f_{\max}$ , может быть использована в качестве входных данных для упомянутого метода, что является перспективой дальнейших исследований.

### ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования показано, что моды мелкого моря могут обладать рядом информационных особенностей, основанных на анализе данных с одиночных гидрофонов в пассивном режиме (возможность их выделения при использовании активных излучателей, как упоминалось в начале работы, уже доказана). Предложен теоретический метод такого выделения, основанный на анализе взаимной функции корреляции шумового поля. При этом немаловажное значение имеет выбор частотного диапазона, в котором происходит выделение моды данного номера, — он должен соответствовать области минимума ее групповой скорости или находиться вблизи него. Данное обстоятельство важно еще и по той причине, что характеристики волновода начинают влиять на модовое распространение немонотонным образом, и этот факт, в свою очередь, мог бы быть положен в основу новых схем акустической томографии мелкого моря. Проведенная обработка данных натурального эксперимента в Баренцевом море подтвердила возможность выделения мод нескольких номеров для расстояний, представляющих практический интерес ( $\approx 14$  км). Кроме того, показана принципиальная возможность наблюдения изменчивости среды на основе анализа частотно-временных вариаций максимумов взаимной функции корреляции шумового поля мелкого моря, что в перспективе может быть

использовано для построения пассивных методов мониторинга мелководных акваторий.

Для повышения надежности сделанных выводов требуется проведение дополнительных экспериментов по описанной схеме, которые позволили бы непрерывно регистрировать сигнал в течение продолжительного времени.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № НШ-283.2014.2, грантов РФФИ №№ 13-02-00632 и 13-01-12469 офм\_м2.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Munk W., Worcester P., Wunsch C. Ocean Acoustic Tomography. Cambridge University Press, 1995. 433 p.
2. Гончаров В.В., Иванов В.Н., Кочетов О.Ю., Курьянов Б.Ф., Серебряный А.Н. Акустическая томография на шельфе Черного моря // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 5. С. 614–622.
3. Акуличев В.А., Безответных В.В., Каменев С.И., Кузьмин Е.В., Моргунов Ю.Н., Нуржденко А.В. Акустическая томография динамических процессов в шельфовой зоне моря с использованием сложных сигналов // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 1. С. 5–11.
4. Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Использование в пассивной томографии океана низкочастотных шумов // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 1. С. 51–61.
5. Пескин М., Шредер Д. Введение в квантовую теорию поля. Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. 784 с.
6. Гончаров В.В., Чепурин Ю.А., Годин О.А. Пассивная акустическая томография океана при использовании антенн неизвестной формы // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 2. С. 193–201.
7. Godin O.A. Recovering the acoustic Green’s function from ambient noise cross correlation in an inhomogeneous moving medium // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. 054301.
8. Godin O.A., Zabolin N.A., Goncharov V.V. Ocean tomography with acoustic daylight // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. L13605.
9. Roux P., Sabra K.G., Thode A.M., D’Spain G.L., Hodgkiss W.S., Kuperman W.A. Using ocean ambient noise for array self-localization and self-synchronization // IEEE J. Ocean. Eng. 2005. V. 30. № 2. P. 338–347.
10. Morley M.G., Dosso S.E., Chapman N.S. Array element localization using ship noise // J. Acoust. Soc. Am. 2009. V. 125. № 3. P. 1403–1409.
11. Курьянов Б.Ф. К возможности пассивной акустической томографии в диффузном шумовом поле // Докл. XI школы-семинара акад. Л.М. Бреховских, совмещенной с XVII сессией РАО. М.: ГЕОС, 2006. С. 179–185.
12. Roux P., Sabra K.S., Kuperman W.A., Roux A. Ambient noise cross-correlation in free space: theoretical approach // J. Acoust. Soc. Am. 2005. V. 117. № 1. P. 79–84.
13. Буров В.А., Сергеев С.Н. Акустическая томография океана по данным с вертикальной модовой антенны, произвольно искривленной подводными течениями // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 2. С. 350–353.

